

# EVAPOFACIES DEL SALAR HOMBRE MUERTO, PUNA ARGENTINA: DISTRIBUCION Y GENESIS

Daniel VINANTE<sup>1</sup> y Ricardo N. ALONSO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Alexander Gold Group LTD, Alberdi 824 Salta, 4400 Salta.

<sup>2</sup> CONICET. Universidad Nacional de Salta. Secretaría de Minería Industria y Recursos Energéticos de la Provincia de Salta.  
E-mail: dan\_vi75@yahoo.com.ar

## RESUMEN

En el presente trabajo se identifican, describen y se muestra la distribución areal de las facies y evapofacies asociadas al ambiente evaporítico del Salar Hombre Muerto, ubicado en el borde oriental de la Puna Austral, en una zona con una amplia difusión de yacimientos de boratos. El salar puede ser dividido en dos subcuencas, la occidental y la oriental, ambas separadas por el islote central de Farallón Catal. La subcuenca oriental es boratífera, con bajo contenido en cloruros, mientras que la subcuenca occidental presenta tanto en superficie como en profundidad potentes acumulaciones de halita (hasta 900 m) y es prácticamente estéril en boratos.

Se plantean varias hipótesis sobre la génesis de la evapofacies boratífera, representada mineralógicamente por el borato ulexita. Esta es la evapofacies de interés económico y que se explota en el salar, donde además se extraen salmueras de litio.

Palabras clave: *Salar Hombre Muerto, Puna, evaporitas, boratos, ulexita.*

**ABSTRACT:** *Evapofacies associated with the Salar Hombre Muerto, Puna: Distribution and genesis.*

This paper identifies, describes and shows the areal distribution of facies and evapofacies associated with Salar Hombre Muerto, located in the eastern border of the Southern Puna, in an area with a wide diffusion of borates. The salar can be divided in two sub-basins, the western and the eastern, both separate for the central island of Farallón Catal. The eastern sub-basin is boratiferous, with low chlorides contained, while the western one shows a thick halite accumulation (up to 900 m) in surface and in depth and it is practically sterile in borates.

Several hypothesis on the genesis of the boratiferous evapofacies, mineralogically represented by the borate ulexite, are proposed. This evapofacies is the economic interest mined area, where lithium brines are also extracted.

Keywords: *Salar Hombre Muerto, Puna, evaporites, borates, ulexite.*

## INTRODUCCION

El salar Hombre Muerto está ubicado en el borde centro oriental de la provincia geológica Puna (Turner 1972) y dentro de ella en la subprovincia geológica Puna Austral (Alonso *et al.* 1984a) en el límite entre los departamentos de Antofagasta de la Sierra (Provincia de Catamarca) y Los Andes (Provincia de Salta). La altitud del piso salino es de aproximadamente 4.000 m sobre el nivel del mar. Constituye un típico depósito evaporítico emplazado en rocas prepaleozoicas, paleozoicas y cenozoicas.

El objetivo del trabajo es describir y mostrar la distribución areal y lateral de facies y evapofacies asociadas al ambiente evaporítico del salar Hombre Muerto. También se postulan varias hipótesis referidas a la génesis de la evapofacies boratífera.

La metodología de trabajo consistió en el reconocimiento y descripción en superficie y en pozos de exploración, generalmente de un metro de profundidad, de las diferentes facies, evapofacies y costras salinas tal cual se observan actualmente en el salar.

La mayor parte de los antecedentes son de carácter regional. Se pueden citar los trabajos de Reichert (1907), Catalano (1964), Igarzábal y Poppi (1980), Nicoli *et al.* (1980, 1982), Schalamuck *et al.* (1983), Alonso *et al.* (1984, 1984a, 1984b), Viramonte *et al.* (1984), González (1984), Alonso (1986, 1991), Alonso y Viramonte (1993), Castillo *et al.* (1992), Godfrey *et al.* (1997), Jordan *et al.* (1999), Vinante (2003), entre otros.

## MARCO GEOLOGICO

Las rocas más antiguas aflorantes en la comarca corresponden a las metamorfitas de la Formación Pachamama (Aramayo 1986, Hongn y Seggiaro 2001) de edad neoproterozoica (Fig. 1). El Ordovícico está representado por grauvacas, pelitas marinas y lavas de las Formaciones Tolillar (Zappettini *et al.* 1994, Zimmermann *et al.* 1999) y Falda Ciénaga (Aceñolaza *et al.* 1975, Aceñolaza *et al.* 1976). En discordancia angular, se encuentran los conglomerados y areniscas rojas de la Formación Geste (Turner 1964) asignada al Eoceno medio (Alonso y Fielding 1986). Siguen por encima los conglomerados, areniscas y pelitas rojas con yeso y eolianitas de la Sedimentita

Vizcachera (Donato y Vergani 1985, Hongn y Seggiaro 2001). Continúa la Formación Catal (Alonso y Gutiérrez 1986). Posee una datación en la base de  $15,0 \pm 2,4$  Ma y otra en el techo de  $7,2 \pm 1,4$  Ma (Alonso 1991). De edad más joven afloran las sedimentitas y evaporitas (boratos y halita) de la Formación Sijes (Turner 1964). Posee dataciones de  $5,86 \pm 0,14$  Ma (Watson en Alonso *et al.* 1984a). Dentro de las volcanitas afloran las dacitas y andesitas de la Formación Tebenquicho, de unos  $14 \pm 5$  a  $11 \pm 1$  Ma (González 1983). La Andesita Ratones (González 1984) de  $7,1 \pm 0,2$  Ma, edad obtenida por Vandervoort (1993). De amplia distribución se encuentran las ignimbritas dacíticas emitidas por el cerro Galán. Posee dataciones radimétricas K-Ar de  $2,56 \pm 0,14$  Ma y una isócrona Rb-Sr que dio un valor de  $2,03 \pm 0,07$  Ma (Francis *et al.* 1983, Sparks *et al.* 1985). Los depósitos cuaternarios están representados por sedimentos clásticos, evaporíticos y las volcanitas basálticas de la Formación Incahuasi (Aceñolaza *et al.* 1976) de  $0,754 \pm 0,02$  Ma, (Alonso *et al.* 1984b).

El análisis de imágenes satelitales permitió determinar el porcentaje de las distintas unidades estratigráficas aflorantes en la cuenca hidrográfica del salar Hombre Muerto: Precámbrico: 10 %, Paleozoico: 25 %, Terciario sedimentario: 5 %, Terciario volcánico: 35 %, Cuaternario (detritico + evaporítico + basaltos): 25 %.

Estructuralmente predomina en la depresión de Hombre Muerto un estilo tectónico relacionado con sistemas transcurrentes (Jordan *et al.* 1999).

Los bordes del salar muestran penetraciones del relieve circundante, entre ellas las denominadas península Tincalayu, península Hombre Muerto y península Incahuasi (Fig. 1). El islote conocido como Farallón Catal, de unos  $72 \text{ km}^2$ , ocupa una posición central en la depresión por lo que la divide en dos subcuencas, una oriental y otra occidental (Fig. 1). Las dos subcuencas se diferencian nítidamente por el contenido de sales presentes. Así mientras la subcuenca oriental es boratífera y con bajo contenido en cloruros la subcuenca occidental se comporta a la inversa. Superficialmente son también muy diferentes: la oriental presenta una resolución superficial limo-arcillosa

dominante de color pardo que puede estar cubierta por una delgada costra salino-yesosa (Fig. 2a), mientras que la occidental presenta tanto en superficie como en profundidad potentes acumulaciones de halita (Fig. 2b). Como rasgo sobresaliente en el interior del salar se destaca la presencia de plataformas travertínicas. Algunas de ellas se relacionan directamente con paleofuentes termales, otras en cambio son de depositación lacustre (Fig. 2c). A pesar que el salar se comporta como una cuenca unitaria, el relieve a uno y otro lado de Farallón Catal consistió en depresiones independientes en su evolución inicial. Los materiales detríticos llegados al sector oriental provienen en gran medida de la destrucción de amplios depósitos de ignimbritas y rocas graníticas. Con respecto al sector occidental, el predominio de terrenos ordovícicos señala la homogeneidad litológica en que está elaborada la depresión.

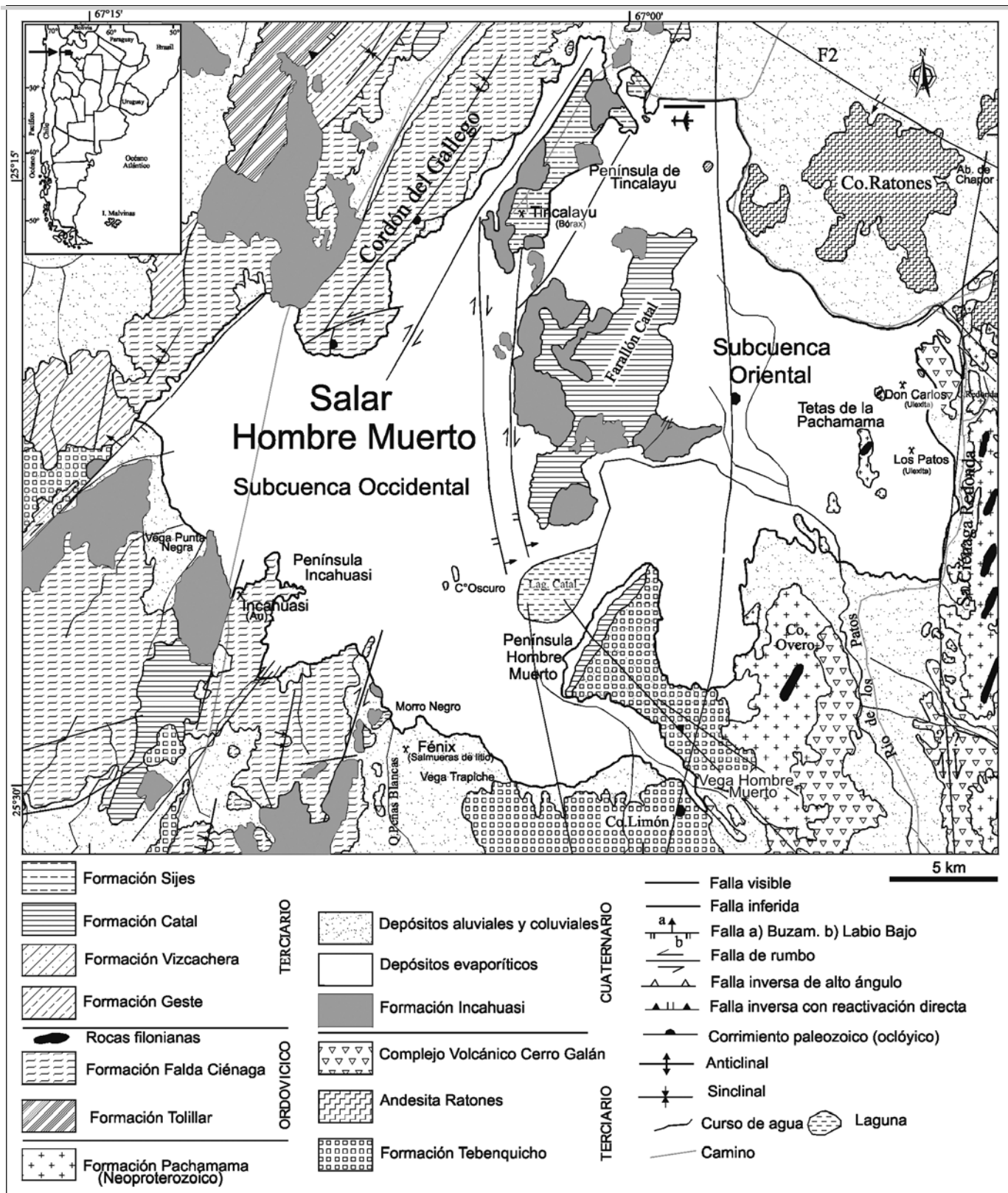
## HIDROGRAFIA

El salar se encuentra emplazado en una cuenca hidrográfica de  $4.000 \text{ km}^2$  de los cuales  $588 \text{ km}^2$  corresponden al ambiente evaporítico. La cuenca presenta un escurrimiento endorreico caracterizado por una baja densidad de drenaje y alto porcentaje de cursos con régimen temporario. Existe un solo curso permanente pero de caudales contrastados entre la temporada seca y húmeda, que es el río de los Patos (Fig. 2b). Este río nace en los flancos norte y este del cerro Galán y recorre unos 60 km hasta desaguar en la margen oriental del salar. Otros cursos nacidos de este cerro lo hacen a partir de manantiales termales, con caudales efímeros (Ej.: río Agua Caliente).

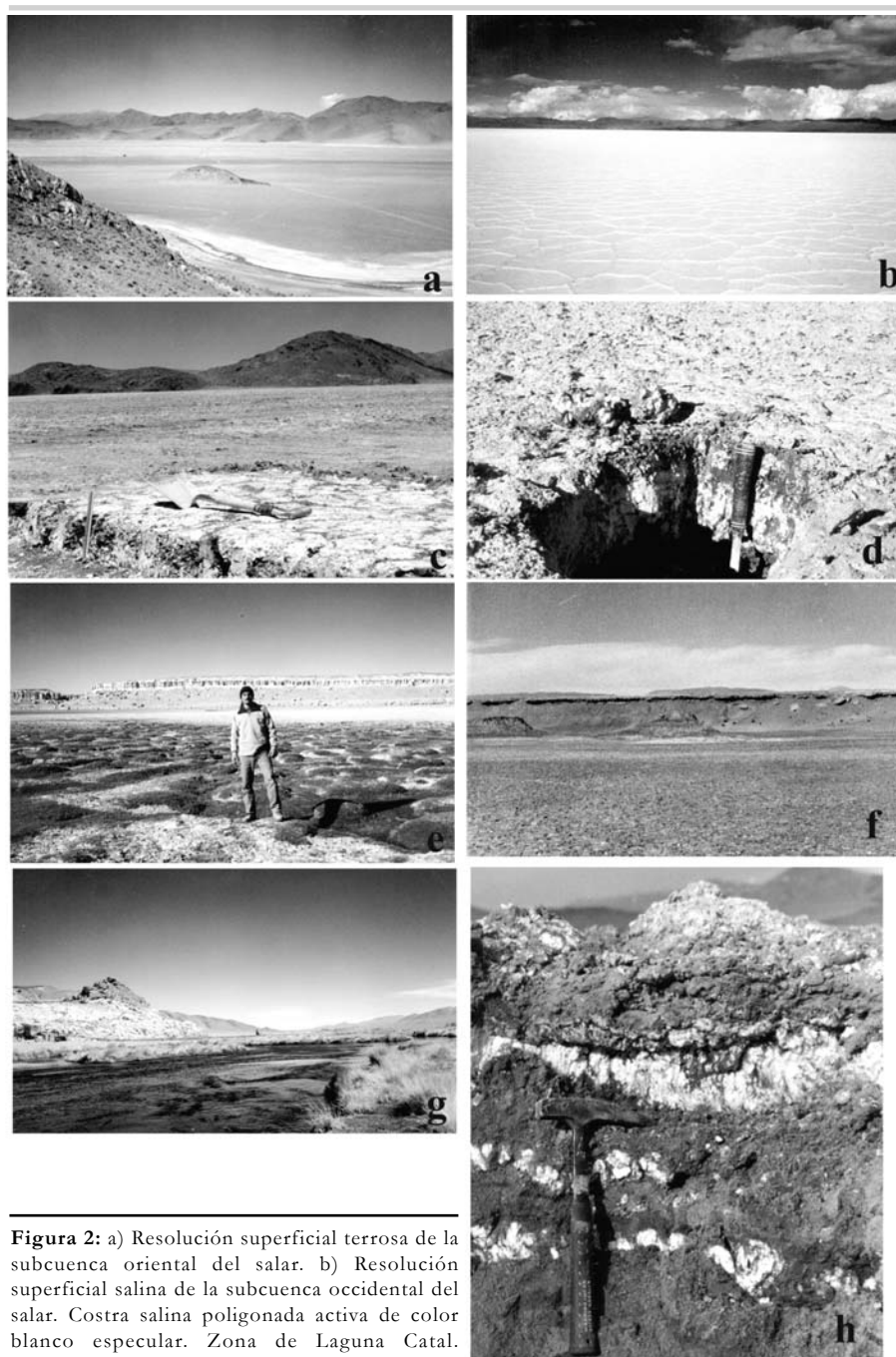
El río de los Patos es la fuente más importante de agua al salar con un caudal medio de 20.000 litros/hora. La cuenca hidrográfica de este río se encuentra elaborada en su casi totalidad sobre la ignimbrita del cerro Galán.

El sector oriental del salar es el más importante desde el punto de vista hidrológico puesto que desemboca el río de los Patos, con cuyas aguas se alimenta la laguna Catal.

En el sector occidental no hay cursos de agua, no obstante se inunda parcialmen-



**Figura 1:** Mapa geológico del salar Hombre Muerto (basado en Hongn y Seggiaro 2001).



**Figura 2:** a) Resolución superficial terrosa de la subcuenca oriental del salar. b) Resolución superficial salina de la subcuenca occidental del salar. Costra salina poligonada activa de color blanco especular. Zona de Laguna Catal. c) Frente de explotación que muestra ulexita en barra debajo de un descarpe yeso-arenoso de escaso espesor. d) Costra salino-terrosa de unos 0,5 cm por debajo arena y luego un nivel de ulexita maciza (barra) de unos 20 cm de espesor. e) Presencia de yaretillas en el borde NE de la subcuenca oriental. f) Terraza coronada por una capa de travertino lacustre de unos 30 cm de espesor. Oeste del Co. Ratones. g) Río de los Patos unos 15 km antes de ingresar al salar. h) Frente de explotación. Se observa un nivel de ulexita en barra de unos 15 cm de espesor y por debajo dos niveles de ulexita nodular (papas). El descarpe, de unos 7 cm, consta de arena y yeso.

Hombre Muerto puede ser tipificado como un salar de descarga, debido a que posee las siguientes características: a) la cuenca es intracontinental, b) el balance hidrológico es negativo para más de la mitad del año, c) la franja capilar del nivel freático está próxima a la superficie. Otra característica de este tipo de salares es que poseen sedimentación evaporítica.

Un muestreo de las aguas del río de los Patos realizado por Gladys M. de Gonzo (2005, com. pers.) desde el nordeste del cerro Galán hasta un poco más abajo de la unión con el río Agua Caliente proporcionó los siguientes valores máximos cerca del salar y mínimos alejados del salar: boro: 3,02 – 15,5 mg/l, arsénico: 0,163 – 0,431 mg/l, cloruro: 574 – 870 mg/l, alcalinidad total ( $\text{CaCO}_3$ ): 162 – 204 mg/l, conductividad: 2.208 – 3.300 ms/cm. Los valores aumentan en dirección sur a norte, es decir a medida que nos acercamos al salar.

La composición isotópica del estroncio (Sr) de las aguas superficiales y salmueras debería reflejar una mezcla de la composición del estroncio de las rocas con las cuales las aguas han interactuado. La figura 3 de Jordan *et al.* (1999) muestra que muchas de las aguas superficiales tienen más estroncio radiogénico que el de las ignimbritas y rocas volcánicas jóvenes. Las composiciones de aguas subterráneas registradas en los travertinos son también radiogénicas. Los valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sugieren que las aguas de las precipitaciones han interactuado eficientemente con las rocas volcánicas jóvenes en las zonas de fallas importantes y que si bien las rocas volcánicas andesítico-basálticas han contribuido químicamente poco al salar moderno o a los depósitos geotermales, han sido probablemente importantes como una fuente de calor para accionar esos sistemas geotermales (Jordan *et al.* 1999). Asimismo estos valores indican que la interacción del agua meteorica con las distintas litologías de la cuenca de drenaje explica la naturaleza química de todas las aguas y salmueras.

## DISTRIBUCION Y CARACTERISTICAS DE FACIES CLAS- TICAS Y EVAPORITICAS

En la figura 4 se han representado las facies

te durante la temporada de lluvias por los bordes de laguna Catal. Hay en cambio unos

pocos manantiales que dan origen a vegas. Según la clasificación de Rosen (1994) el salar

clásticas y evaporíticas tal cual se observan actualmente en el salar. A grandes rasgos muestra un desarrollo de facies clásticas perimetrales que gradan a facies evaporíticas depocentrales.

### Facies clásticas

Se extienden, a manera de faja discontinua, en los bordes del salar y no alcanzan una extensión apreciable. El ancho de esta faja es muy variable; así, en el borde occidental del salar, su desarrollo está muy limitado, mientras que hacia al norte, noreste, este, sudeste y sur se encuentra mucho mejor representada. Como es de esperarse el mayor desarrollo de esta facies está vinculado a los ríos de los Patos y al Trapiche. Con respecto a la granulometría, en todos los casos estas son decrecientes hacia el salar y gradúan desde gravas gruesas, pasando a gravas medias y finas, luego siguen las arenas y finalmente se pasa a la zona de limos y arcillas. Las gravas se encuentran en la zona conocida como abanico aluvial (*alluvial fan*), las arenas en las planicies arenosas (*sand flat*) y finalmente los limos y arcillas en el *mud flat* (Hardie *et al.* 1978, Alonso 1992). El desarrollo de estas zonas es variable y no siempre es fácil identificarlas y separarlas nítidamente, en especial donde su ancho es muy reducido. En la planicie barrosa (*mud flan*) ocurren eflorescencias, formadas por una mezcla de varias sales (carbonatos, sulfatos, cloruros).

### Facies carbonáticas

Se distinguen dos tipos de presentaciones.

a) Travertinos termales que se encuentran en el borde occidental de Farallón Catal y se asocian a un sistema de fallas de orientación aproximada norte. Estos se observan a nivel del piso salino y se muestran como muy erosionados y presentan una típica configuración subcircular a circular. Catalano (1964) mencionó la presencia de bancos de travertinos, en los alrededores del volcán Hombre Muerto y que se pierden en el salar, cerca de la vega de Hombre Muerto. En las laderas del oeste de la península Hombre Muerto citó travertinos que serían restos de conos de *géiseres*.

b) Travertinos lacustres que se encuentran formando afloramientos saltuarios, generalmente terrazados, principalmente sobre las márgenes del salar. En el sector noreste del salar, al oeste del cerro Ratones, se presentan islotes sobreelevados 1 a 3 metros con respecto al nivel del salar, cubiertos por una capa de travertino, de 10 a 30 cm de espesor (Fig. 2d). En la zona de la pista de aterrizaje también se encuentran travertinos terrazados sobre las márgenes del salar. En toda la zona del salar que limita con la vega de Junquillar existe una gran extensión de travertinos. En la entrada que hace el salar al oeste de Punta Gorda aparecen travertinos lacustres que se internan a más de un kilómetro dentro del salar. La parte central y norte de salina Larga en general se halla cubierta por restos de bancos de travertinos sobreelevados 30 a 80 cm sobre el piso salino. Estos travertinos terrazados y sobreelevados representarían cambios en el nivel de base, o más bien situaciones previas de mayor contenido de agua en la cuenca de Hombre Muerto.

c) Yaretilas: Estas se presentan en el borde del salar, como plantas almohadilladas halófilas en forma de domo así llamadas. Esta es una planta ampliamente distribuida en la playa salina. Se reconoció una faja de yaretilas de unos 25 km de longitud pero muy angosta sobre el borde norte y noreste del salar, desde la zona ubicada al este de la península Tincalayu hasta la latitud de Ciénaga Redonda (Fig. 2c). En el extremo norte de salina Larga, al oeste de la península Tincalayu, Catalano (1964) mencionó grandes extensiones cubiertas por yaretilas. Se considera a esta planta dentro de esta facies debido a que entran carbonatos en su constitución (Alonso 1992, Vinante 2003). Los carbonatos indican la fase menos soluble. Ambos tipos, lacustres y termales, están compuestos mineralógicamente por calcita y aragonita. Si se compara el desarrollo de la evapofacies carbonática con las otras evapofacies se ve que esta es la menos representada.

### Evapofacies sulfatífera

Presenta un mejor desarrollo y distribución que la evapofacies anterior. Se encuentra a

manera de faja continua que bordea prácticamente todo el salar, excepto el borde que se extiende desde la península Incahuasi hasta la latitud de Burruyacu y el borde occidental de Farallón Catal que no tienen representada a esta evapofacies. Esto es debido a que en la subcuenca occidental se encuentra el depocentro, lugar que no es el adecuado para la deposición de esta evapofacies. La evapofacies está muy desarrollada en el sector sudeste es decir, por donde ingresa el río de los Patos a la subcuenca oriental y en la zona ubicada al este de la península Incahuasi en coincidencia con el ingreso de los principales aportes hídricos a la subcuenca occidental. Mineralógicamente se encuentra compuesta por yeso, el que se presenta principalmente como arenas yesíferas (gipsarenita), cristales seleníticos y rosetas.

### Evapofacies boratífera

En el mapa se puede observar que la evapofacies boratífera se distribuye en las siguientes regiones del salar, principalmente en su mitad oriental, que pueden considerarse como depocentros mayores:

**Depocentro I (DI):** Corresponde a la región norte, que abarca toda la extensión limitada por la península Tincalayu, el cerro Ratones y al sur, la línea que va desde el extremo sur de la mencionada península siguiendo toda la costa del extremo norte de Farallón Catal hasta la orilla oeste del campo aluvial del cerro Ratones. Esta zona es una de las más ricas en ulexita de todo el salar, por esto Catalano (1964) la llamó “boralpa”, término que en quechua significaría tierra rica en boro. La evapofacies tiende a ocupar casi toda esta zona y se encuentra rodeada, en su casi totalidad, por la evapofacies yesífera y sólo sus bordes más occidentales se interdigitan con la evapofacies halítica del depocentro de la cuenca. Por lo tanto, el depósito de ulexita finaliza en la estrecha conexión entre la península Tincalayu y Farallón Catal.

**Depocentro II (D II):** Se extiende desde la margen oriental de Farallón Catal hacia el este. Esta extensa zona boratífera en gran parte suele inundarse por los desbordes del

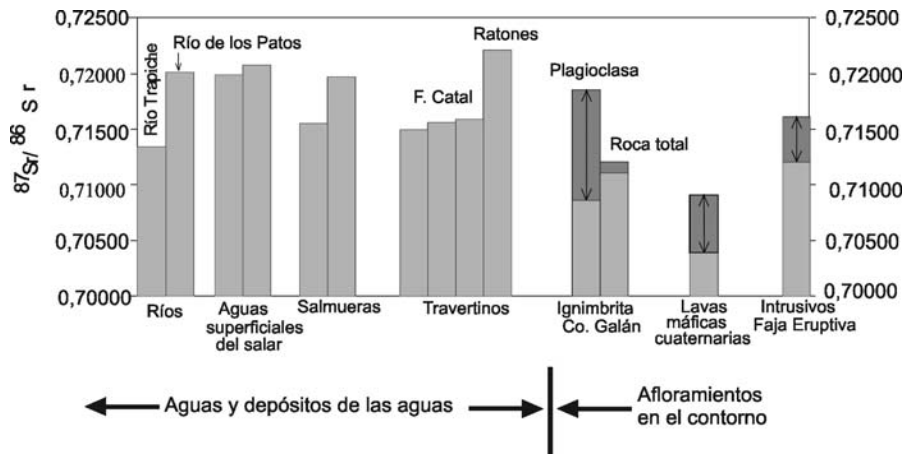


Figura 3: Proporciones isotópicas de Sr (Jordan *et al.* 1999)

río de los Patos, formándose grandes lagunas que dificultan el cateo y la explotación en gran parte de ella. Estas lagunas son temporarias y la extensión que cubren varía según las épocas del año. La evapofacies boratífera se encuentra rodeada, en su casi totalidad, por la evapofacies yesífera. En el borde sur por donde ingresa el río de los Patos existe un mayor desarrollo de la evapofacies yesífera. Se puede advertir que la evapofacies se encuentra recostada hacia el sector norte de esta región. Los remanentes de ásporos salinos indicarían depresiones locales de mayor profundidad que posibilitaron la acumulación de halita. Si se traza en el mapa de facies una línea desde donde penetra el río de los Patos hacia el cerro Ratones se aprecia una clara asimetría en el desarrollo de las diferentes facies. Se observa el mayor desarrollo de la evapofacies yesífera y facies clástica hacia el sur y el menor desarrollo de las mismas hacia el norte como así también la presencia de remanentes de ásporos salinos indicarían una profundización de esta región hacia el norte y que en el pasado existía un importante aporte de agua a partir del río de los Patos. Esta región se comunica con la anterior mediante un angosto paso ubicado entre el borde NE de Farallón Catal y la ladera SO del cerro Ratones.

**Depocentro III (D III):** Es la región que se

encuentra al este de la península Hombre Muerto, en la entrada que hace el salar y que se extiende hacia el sudeste de Farallón Catal. El análisis del mapa nos muestra que la evapofacies se encuentra recostada hacia el borde occidental de la zona, excepto por una saliente ubicada en el sudeste de la región y que presenta un mayor desarrollo de la facies yesífera y clástica hacia su borde oriental. Esta asimetría en sentido este-oeste indica una mayor profundización de esta zona hacia el oeste y un aporte antiguo de agua hacia el este en coincidencia con el río de los Patos.

**Depocentro IV (D IV):** Es la estrecha zona ubicada enfrente de la península Hombre Muerto y que conecta a la zona anterior con la que sigue. Esta es la zona más angosta de todas. Hacia el oeste se pasa al depocentro de la cuenca donde se depositaba halita. Enfrente de la península Hombre Muerto se presenta una angosta faja con evapofacies boratífera que hacia el oeste pasa rápidamente al depocentro de acumulación de halita y hacia el este una franja muy estrecha de evapofacies yesífera la separa de las facies clásticas de la península Hombre Muerto.

**Depocentro V (D V):** Corresponde a la región ubicada al sur y sudoeste de la península Hombre Muerto y que se extiende desde la

vega Hombre Muerto hasta las proximidades del cerro Oscuro y Morro Negro. Se encuentra rodeada al este al sur y al oeste por la evapofacies yesífera y sólo hacia el norte (alrededores de Laguna Catal) y noroeste (inmediaciones de cerro Oscuro) se interdigita con la evapofacies halítica del depocentro de la cuenca. El mayor desarrollo de la evapofacies yesífera al este de la península Incahuasi y en coincidencia con la quebrada de Peñas Blancas indicaría que en el pasado existía aquí un mayor aporte de agua que diluía la salmuera del cuerpo lacustre impidiendo la depositación de evapofacies más solubles. La presencia de remanentes de ásporos salinos indica la presencia de antiguas depresiones locales de mayor profundidad que posibilitaron la acumulación de halita.

Se puede observar en el mapa que las dos primeras regiones (DI y DII) se encuentran actualmente desvinculadas de las otras tres regiones ubicadas más al sur. Las tres regiones del sur se encuentran vinculadas entre sí mediante el área depocentro IV (DIV).

Resulta llamativo como la evapofacies boratífera se distribuye a ambos lados del río de los Patos y a partir de la entrada del río en el salar. Asimismo esta zona es la que presenta el mayor desarrollo de la facies clástica y yesífera, dando evidencia de que el principal aporte hídrico a la cuenca dependió casi siempre del río de los Patos.

La evapofacies boratífera está representada mineralógicamente por ulexita ( $\text{CaNa}[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) característica de los yacimientos de boratos en salares. Se presenta en sus clásicas estructuras nodular ("papas") y maciza ("barras"). Este es el mineral de interés económico que se explota en el salar Hombre Muerto. Otras especies minerales evaporíticas asociadas son calcita, halita, yeso y sulfato de sodio (mirabilita).

Sobre el terreno se pudo determinar que la evapofacies de ulexita ocurre en cuerpos mantiformes de espesores variables (en corta distancia puede variar notablemente su espesor) y geometría irregular, en niveles de estructura nodular (papas) o maciza (barras) (Figs. 2f, 2g y 2h), asociada con arenas finas, arenas finas limosas y arcillas, yeso y halita. Además se pudo apreciar la presencia de cuerpos aislados (bolsones), de escasa proyección areal, de hábito más o

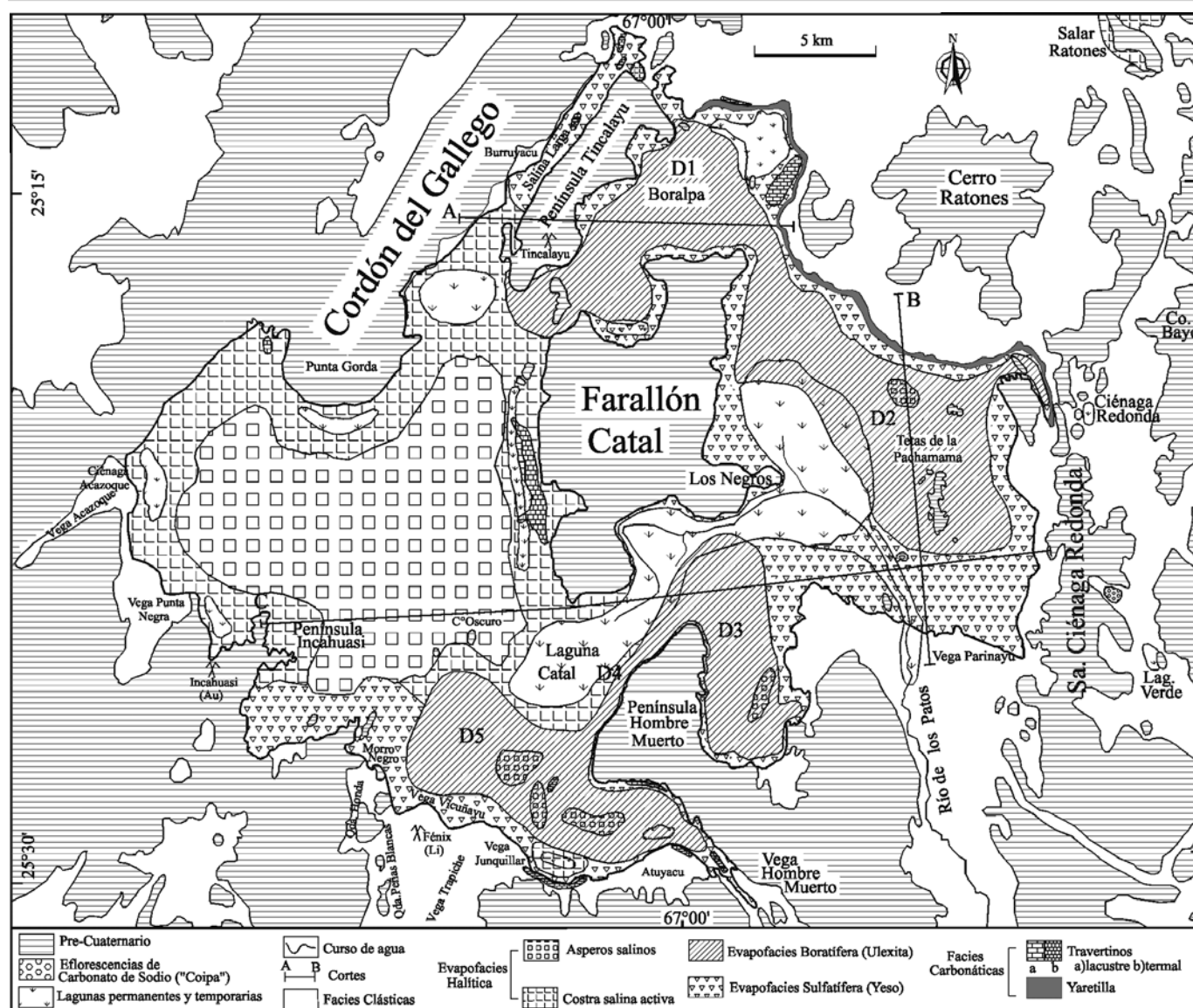


Figura 4: Distribución areal de facies y evapofacies. Ubicación de los cortes laterales de facies.

menos circular a veces elongados, donde en poca distancia se alcanza espesores importantes. En otros casos se presenta como bolsones aislados de escaso espesor. Los espesores máximos medidos son de 70 centímetros. En algunos casos se observan ritmitas de ulexita clásticos. En general existe una tendencia a la estratificación de los niveles ulexíticos. Así, por debajo de una capa de costras (salino-yesífera) y delgadas eflorescencias salino-terrosas, o una mezcla de arcillas-arenas-gipsarenita, se desarrolla el borato en niveles de 2 a 30 centímetros de espesor ya sea nodular o macizo, intercalado con capas de arenas, limos, arcillas o

gipsarenita (yeso granular). El sustrato de la capa boratífera está constituido comúnmente de arcillas rojas o verdes plásticas, en algunos casos fétidas; no se han encontrado travertinos de origen termal y tampoco se mencionan en la bibliografía existente. El descarte generalmente no supera los 10 cm de espesor y sólo ocasionalmente puede medir entre 30 y 40 centímetros. Las irregularidades del piso o lecho, generan depresiones locales donde se acumula agua, que en consecuencia favorecen la diferenciación de niveles mineralizados. Tampoco se ha observado una zonación entre ulexita nodular y maciza que pudiera atestiguar la

existencia de paleofuentes termal tal como fuera mencionado para los Salares Centenario, Ratones, y otros por Alonso y Gutiérrez (1984).

### Evapofacies halítica

Se encuentra en la subcuenca occidental, ocupándola en casi su totalidad. En superficie se reconocen dos tipos morfológicos: "ásperos salinos antiguos" y "costra poligonada activa" (Fig. 2e). Los "ásperos salinos" (Catalano 1964) ocupan una posición central y se caracterizan por crestas salinas, duras, agudas, filosas y resistentes, con



impurezas clásticas que le confieren un color pardo claro. Se trata de una costra fósil (Igarzábal y Poppi 1980). La costra poligonada activa, es lisa o con rebordes de figuras poligonales, bordea marginalmente a los ásperos, y se renueva anualmente, mostrando una superficie especular blanca. Presentan espesores desde pocos centímetros hasta más de 50 cm, se presentan en bancos estratiformes rítmicos.

La costra poligonada activa está en contacto con la evapofacies boratífera al sur de la península Tincalayu y en la zona de laguna Catal y cerro Oscuro. En el borde que se extiende desde la península Incahuasi hasta un poco al sur de Burruyacu y también en el borde occidental de Farallón Catal la evapofacies halítica se encuentra en contacto con el marco rocoso o con zonas clásticas de escaso desarrollo, esto puede deberse a que no existían ni existen hoy en esta zona cursos importantes de agua que pudieran diluir la salmuera evitando la deposición de halita. En los alrededores del cerro Oscuro se producen interdigitaciones de la evapofacies halítica con la evapofacies yesífera y boratífera, esto estaría indicando una dilución de la salmuera que anuló la deposición de halita pero no evitó que se depositaran evapofacies menos solubles (yeso y boratos).

El sur de Salina Larga está constituido por una extensa salina blanca de unos 4 km de largo. La sal es blanca, pura, en estratos de más de 30 cm de espesor. El borato, excepto en algunas pequeñas zonas en la orilla de la península, prácticamente puede descartarse de toda esta región (Catalano 1964). La parte central y norte se halla cubierta por restos de bancos de travertinos lacustres y material areno-yeso-arcilloso. El travertino de 5 a 20 cm de espesor aparece como plataformas sobreelevadas 30 a 80 cm con respecto al piso del salar. En el extremo norte de Salina Larga se encuentra una salina con figuras poligonales, debajo de la sal sigue arena, arcilla y yeso rojizo debido a impurezas, con pequeños nódulos de ulexita. También existen en esta zona, dominada por terrenos yesosos, grandes extensiones de yaretila.

Las evapofacies halíticas representan las sales de mayor solubilidad que cristalizan al final en las salmueras y se concentran en las

depresiones más profundas de la cuenca. La empresa FMC-Minera del Altiplano realizó varios perfiles gravimétricos en la subcuenca occidental del salar; dos de estos perfiles dieron espesores de halita que van desde 700 a 900 metros. Jordan *et al.* (1999) tomando como base la velocidad de acumulación de la halita de 500 m/Ma (Godfrey *et al.* 1997), estimaron que los 700 a 900 m de halita interpretados por los perfiles gravimétricos se acumularon durante 1,5 a 2 Ma. El análisis de Godfrey *et al.* (1997) de un testigo de 40,7 m extraído de la subcuenca occidental por FMC-Minera del Altiplano, indica que en esa zona, no existieron lagos de agua dulce durante los últimos 85.000 años, también reconocieron cuatro ciclos deposicionales, de halita primaria, formada en subambientes de lagos salinos, intercalada con halita diagenética formada en salares secos. Los cuatro ciclos indican cambios climáticos, desde intervalos húmedos (lagos salinos) hasta intervalos secos, parecidos a la actualidad. Se comenta además que en el extremo norte del salar y en el extremo sur de Farallón Catal, se encuentran sedimentos limo-arcillosos pardos amarillentos con diatomeas (Igarzábal y Poppi 1980) que indican antiguas líneas de costa y demuestran períodos de mayor contenido de agua en la cuenca.

## DISTRIBUCION LATERAL DE FACIES

Se desprende de la observación de la distribución de las evapofacies en el salar Hombre Muerto que su zonación no alcanza las características clásicas del modelo ojo de toro (*bull-eye*). Sin embargo, puede establecerse el siguiente modelo tentativo de distribución de facies desde los bordes hacia el centro: facies clásticas, facies carbonáticas, evapofacies yesífera, evapofacies boratífera y evapofacies halítica (Fig. 4). De este modo la evapofacies boratífera ocuparía una posición aproximadamente intermedia entre la evapofacies yesífera y halítica. Esta distribución muestra también una zonación de cationes desde calcio en la periferia hasta sodio en el depocentro. El predominio de halita en la subcuenca occidental del salar indica que aquí se encuentra el depocentro de la cuenca. La subcuenca oriental se encuentra

dominada por las evapofacies boratífera y yesífera. Las evapofacies aumentan de espesor en sentido este-oeste. La interposición de relieves como Farallón Catal impide el desarrollo normal en la zonación lateral de las evapofacies.

A los fines de mostrar en forma esquemática la distribución lateral de facies se realizaron tres cortes evapofaciales (Fig. 5). Su ubicación puede verse en la figura 4.

El corte A tiene rumbo este-oeste. Muestra al oeste una zona con halita (Salina Larga) y casi nulo desarrollo de facies clásticas. Luego se encuentra la península Tincalayu y hacia el este se desarrolla la evapofacies yesífera y boratífera, más al este vuelve a aparecer yeso, una angosta faja de carbonatos representada por yaretilas y plataformas sobreelevadas de travertinos lacustres y finalmente las facies clásticas pertenecientes a la bajada aluvial del cerro Ratones. La evapofacies boratífera se encuentra limitada al este y al oeste por la evapofacies de yeso.

El corte B tiene rumbo norte-sur y su objetivo es mostrar la variación lateral de facies desde el abanico aluvial del río de los Patos hasta el flanco sur del cerro Ratones. Este corte muestra una asimetría en el desarrollo de las evapofacies yesífera y boratífera dada por el mayor desarrollo de las mismas hacia el sur y el menor hacia el norte. La evapofacies carbonática, representada por una angosta faja de yaretilas, sólo está presente al sur del cerro Ratones.

El corte C se extiende desde la península Incahuasi hasta la sierra de Ciénaga Redonda. Este muestra claramente como se va pasando desde las facies clásticas ubicadas al este, siguiendo con las evapofacies yesífera y boratífera para culminar hacia el oeste con la evapofacies halítica del depocentro. En el corte se puede apreciar la gran asimetría de la cuenca. Así, mientras al este existe un gran desarrollo de la evapofacies de yeso, al oeste sólo hay halita y, al centro sólo evapofacies boratífera.

La figura 6 es un corte esquemático del salar al sur de Farallón Catal que muestra la distribución tentativa de las evapofacies y donde se ve la clara asimetría de la cuenca. A los fines ilustrativos la ulexita se representó en todos los cortes como un manto continuo, lo cual no significa que ocurra



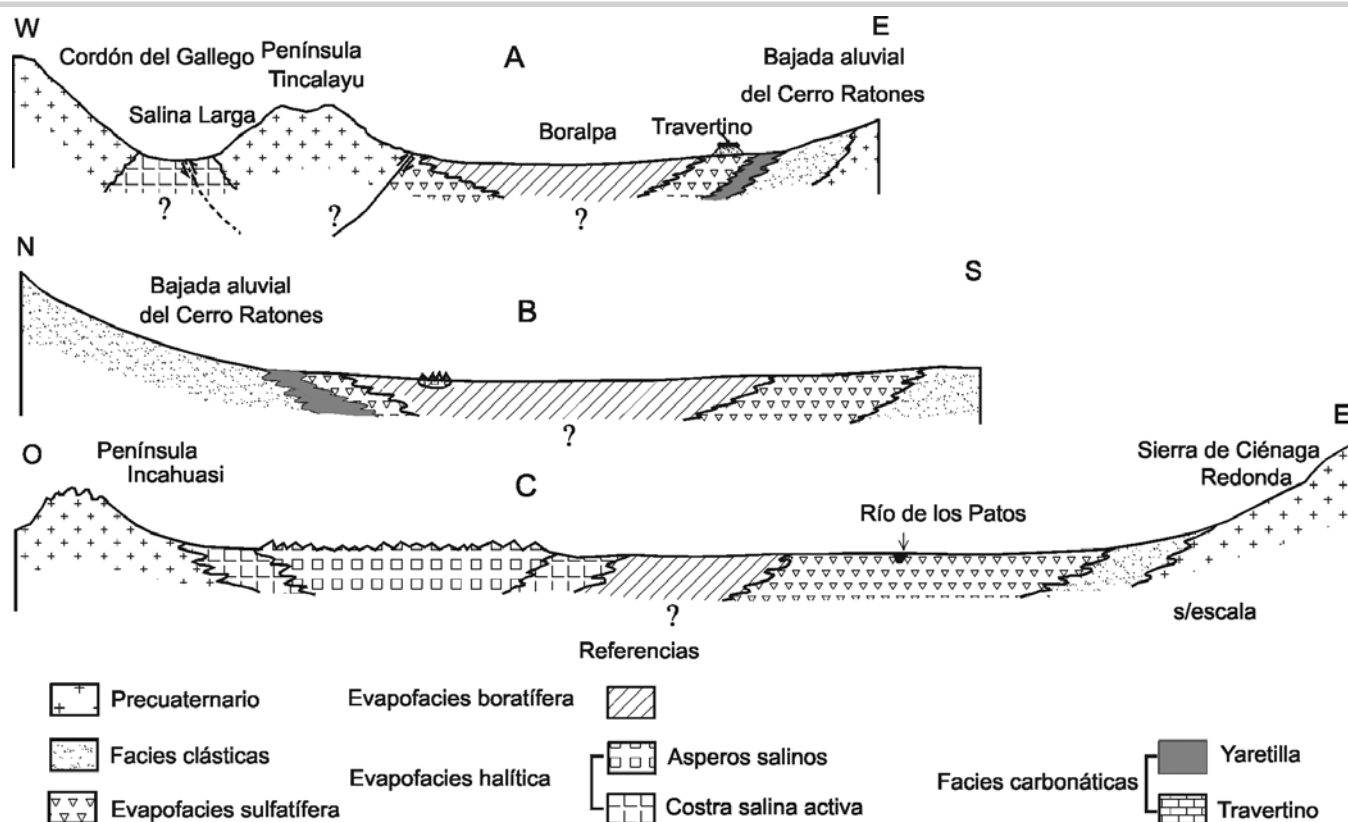


Figura 5: Cortes de distribución lateral de facies y evapofacies. Ubicación en figura 4.

como tal. En todos los casos que se pudo observar el piso o lecho del depósito, que se encuentra aproximadamente a 1 o 1,5 m de profundidad, está constituido por arcillas, que suelen ser de color rojizo, verde y muy plásticas, en algunos casos son más oscuras y fétidas. No se encontraron niveles de travertinos por debajo del depósito ni en zonas sin mineral. Tampoco se observan superficialmente (excepto al oeste de Catal) depósitos importantes de travertinos que pudieran señalar en forma evidente la presencia de paleofuentes termales. No obstante esto, se puede extraer del trabajo de Catalano (1964), que existen zonas no muy extensas donde el piso del depósito está constituido por material arcillo-yesoso o arenoso cementado por calcáreo. Esta característica se da en las zonas mineralizadas aledañas a las vegas de Junquillar y Atuyacu y en un pequeño sector en el norte de la región al este de la península Hombre Muerto.

De acuerdo con lo expuesto en los párrafos anteriores, la zonación evapofacial late-

ral tiene una aceptable definición. Sin embargo, nada se sabe de la zonación vertical de facies; esto es, las facies que ocurren por debajo del piso de arcillas o si existen otros niveles boratíferos, debido a la ausencia de perforaciones que alcancen el basamento del salar.

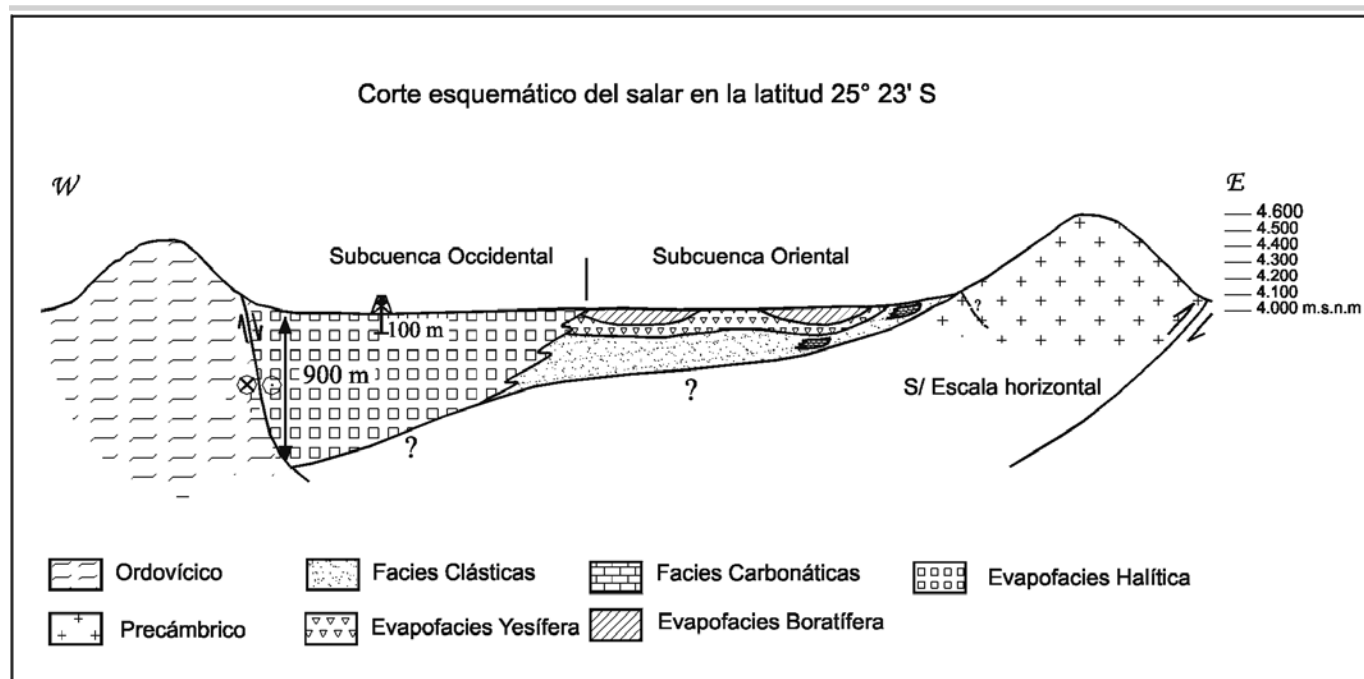
El ambiente actual del Salar Hombre Muerto, más las características de las sedimentitas cenozoicas presentes demuestran una continuidad espacio-temporal de facies evaporíticas a lo largo de 15 millones de años (Jordan *et al.* 1999). Estas se inician con yeso/halita a los 15 Ma, continúa con yeso/travertinos a los 13 Ma, luego tincal/yeso/halita a los 6 Ma, facies de yeso-halita entre los 2 y 0,754 Ma y finalmente la evapofacies del salar depositados en el Pleistoceno Superior- Holoceno (Alonso 1991).

## GÉNESIS

Varios autores (Catalano 1964, Alonso 1986,

Castillo *et al.* 1992) han intentado plantear un modelo genético que pudiera explicar la deposición de ulexita en el Salar Hombre Muerto y en todos los casos, si bien no observan fuentes termales, atribuyen a éstas la génesis del borato.

En los salares Diablillos, Ratones y Centenario (Alonso y Gutiérrez 1984, Alonso 1986) hay una clara relación genética entre el borato y las paleofuentes termales evidenciadas por travertinos asociados a fallas. Las paleofuentes termales que dieron lugar a los travertinos del oeste de Farallón Catal no se encuentran asociados lateral y verticalmente a evapofacies boratíferas y por lo tanto no pueden considerarse que hayan jugado un papel importante en la generación del borato. Por otro lado las paleofuentes termales se ubican en la subcuenca occidental donde predomina la halita y hay muy escaso borato (los travertinos pasan lateralmente a halita); mientras que en la subcuenca oriental donde domina el borato no hay



**Figura 6:** Corte esquemático del salar en la latitud 25° 23'S.

evidencias de paleofuentes termales. Otra particularidad del salar Hombre Muerto es que en general existe una tendencia a la estratificación de los niveles mineralizados. Otra característica es el escaso espesor de los niveles con mineral, que puede ser explicado por la dilución de la solución boratífera en un cuerpo lacustre poco profundo. Tampoco se observa una zonación entre ulexita nodular (papas) y maciza (barras o bancos) tal como fuera planteado para el salar Centenario por Alonso y Gutiérrez (1984) que pudiera atestiguar la existencia de paleofuentes termales.

Por las razones mencionadas parecería que los niveles de ulexita no están relacionados a una depositación directa en las adyacencias de fuentes termales sino a una distribución areal producto de la difusión de la carga de solubles en un medio ácuo somero (lago salino). La recurrencia de episodios secos y húmedos ya fue planteada por Godfrey *et al.* (1997). Esto también permite explicar el escaso espesor de los niveles con mineral y las ritmitas de ulexita-clásticos.

Por lo tanto se postula que al menos una parte del boro y los demás elementos químicos que constituyen las evaporitas del salar Hombre Muerto han sido aportados

principalmente en solución por las aguas superficiales (principalmente por el río de los Patos) y subterráneas. Por esto se atribuye al lixiviado de las piroclastitas emitidas por el cerro Galán, presentes en la cuenca hidrográfica, gran parte del origen del boro y demás sales. Otra parte del boro y demás elementos aportados a la cuenca debe haber sido inyectada al circuito hidrológico a partir de las cámaras magmáticas en enfriamiento; por ejemplo, se sabe que el río Agua Caliente, afluente del río de los Patos, tiene un aporte termal actual en sus nacientes en el flanco norte del cerro Galán.

No se descarta que entre los viejos aportes al Salar Hombre Muerto pudo haber intervenido algún curso proveniente del salar Diablillos en un nivel de lago alto. También pueden haber existido conexiones subterráneas entre ambas cuencas.

Nicolli *et al.* (1980) y Viramonte *et al.* (1984) al estudiar la génesis del litio en los salares de la Puna postularon que las sales solubles adsorbidas en las piroclastitas neoterciarias y cuaternarias del borde oriental de la Puna, deben haber jugado un papel muy importante en el aporte de elementos químicos al circuito hidrológico.

La red hidrográfica del río de los Patos está

elaborada casi en su totalidad sobre las piroclastitas emitidas por el cerro Galán. Estas rocas son ricas en sales solubles adsorbidas y son fácilmente lixiviables. Consideramos que el aporte de boro al cuerpo lacustre que depositó la el borato en la subcuenca oriental del salar Hombre Muerto provino justamente del lavado de estas rocas.

El contenido de boro actual en las aguas del río de los Patos es de 15,5 mg/l unos 15 km antes de llegar al salar. De acuerdo con esto se ha realizado un cálculo teórico para probar la importancia que tuvo el lixiviado en el aporte de boro a la cuenca de depositación. Partiendo de una base mínima de valores teniendo en cuenta la situación actual del río y considerando que esos datos han permanecido constantes durante los últimos 10.000 años (aunque sabemos que existieron épocas más húmedas, con mayores caudales e índices de meteorización), se puede calcular en forma generalizada el aporte de boro. Así, si por litro hay 15,5 mg en 20.000 litros (caudal horario medio del río), habrá 0,31 kg; o sea que en 24 horas tendremos 7,4 kg de boro. Esto equivale a 2,7 tn anuales. Si extrapolamos esto a 2,2 Ma (edad de la ignimbrita del Galán) nos da 5,94 Mtn de boro elemental.

Se puede plantear una analogía en la distribución de la depositación de ulexita entre el salar Hombre Muerto y el salar de Uyuni ubicado en el Altiplano boliviano. En el salar de Uyuni el principal aporte hídrico es el río Grande, que ingresa por el sur. Aquí el río construyó un amplio cono dentro del salar y a ambos lados del mismo se encuentra el depósito de ulexita. En el salar Hombre Muerto la depositación también tiende a distribuirse a ambos lados del cono construido por el río de los Patos, que es el principal aporte hídrico al salar. En ambos casos se observa la coincidencia de la posición espacial deltaica de los mantos de ulexita y la ausencia de fuentes termales cercanas.

## CONCLUSIONES

Se distinguen dos subcuencas en el salar Hombre Muerto. Ambas se diferencian nítidamente en el contenido de sales presentes. Los distintos tipos de superficies y costuras pueden utilizarse como una guía de prospección de las sales sub-superficiales. La interposición del islote Farallón Catal impide el desarrollo normal en la zonación lateral de las evaporitas.

Se pudieron diferenciar cinco zonas mineralizadas. El borato dominante en todo el salar es ulexita que se presenta principalmente en estructura nodular (papas) formando horizontes o diseminadas. La presentación en barras es menos frecuente.

El depósito de ulexita del salar Hombre Muerto, estaría relacionada a un lago salino somero, que recibió aportes de solutos a partir de las aguas superficiales y subterráneas. Se considera que el río de los Patos debe haber jugado un papel fundamental en el aporte de gran parte del boro y demás sales al salar mediante el lixiviado de las piroclásticas emitidas por el cerro Galán. Otra parte del boro y demás elementos aportados a la cuenca debe haber sido inyectada al circuito hidrológico a partir de las fuentes termales.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo de Investigación de la UNSa (Proyecto 1037/0), a la Universidad Nacional de Salta por los aportes brin-

dados y a la Empresa Salta Minerales por permitir el ingreso a sus instalaciones.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aceñolaza, F., Toselli, A. y Durand, F. 1975. Estratigrafía y paleontología de la región del Hombre Muerto, provincia de Catamarca, Argentina. 1° Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, Actas 1: 109-123, Tucumán.
- Aceñolaza, F., Toselli, A. y González, O. 1976. Geología de la región comprendida entre el salar del Hombre Muerto y Antofagasta de la Sierra, provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31 (2): 127-136.
- Alonso, R. N. 1986. Ocurrencia, posición estratigráfica y génesis de los depósitos de boratos de la Puna argentina. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, 196 p., Salta.
- Alonso, R. N. 1991. Evaporitas Neógenas de los Andes Centrales. En Pueyo, J. J. (coord.) Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos. Universidad de Barcelona, Estudios Generales, Publicación 2: 267-332.
- Alonso, R. N. 1992. Sedimentología evaporítica en la Puna. 4° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas 2: 916, La Plata.
- Alonso, R. N. y Gutiérrez, R. 1984. Zonación de ulexita en los salares de la Puna argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 39 (1-2): 52-57.
- Alonso, R. N., Viramonte, J. y Gutiérrez, R. 1984a. Puna Austral. Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 43-63, Bariloche.
- Alonso, R. N., Gutiérrez, R. y Viramonte, J. 1984 b. Megacueros salinos cenozoicos en la Puna argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 25-42, Bariloche.
- Alonso, R. N. y Gutiérrez, R. 1986. Litoestratigrafía del Neógeno terminal, Puna sudoriental argentina. *Revista del Instituto de Geología y Minería de Jujuy*, Universidad Nacional de Jujuy, 6: 29-47, Jujuy.
- Alonso, R. N. y Fielding, E. 1986. Acerca de un nuevo yacimiento de vertebrados paleógenos en la Puna Argentina (Antofagasta de la Sierra, Catamarca). 3° Jornadas Argentinas de Paleontología de Vertebrados, 1:5, Buenos Aires.
- Alonso, R. N. y Viramonte, J. 1993. La cuestión genética de los boratos de la Puna. 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 5: 311-316, Mendoza.
- Aramayo, C. 1986. Geología y petrología del borde NE del salar del Hombre Muerto (provincia de Catamarca). Tesis Profesional Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta (inédita), 122 p., Salta.
- Castillo, A. L., Battaglia, R., Daroca, J. y Morello, C. 1992. Yacimientos de ulexita en el salar de Hombre Muerto, Salta-Catamarca, República Argentina. 5° Congreso Nacional de Geología Económica y 1° Congreso Latinoamericano de Geología Económica, Actas: 272-280, Córdoba.
- Catalano, L. 1964. Estudio geológico-económico del salar Hombre Muerto. Secretaría de Industria y Minería. Estudios de Geología y Minería Económica. Serie Argentina 4: 1-133, Buenos Aires.
- Donato, E. y Vergani, H. 1985. Geología del sector occidental de la Puna Salteña. Yacimientos Petrolíferos Fiscales. Gerencia de Exploración, Informe interno, (inédito) 52 p., Buenos Aires.
- Francis, P.W., O'Callaghan, L., Kretzchmar, G. A., Thorpe, R. S., Sparks, R., Page, R., De Barrio, R., Guillou J. y González, O. 1983. The Cerro Galán Ignimbrite. *Nature* 301(1): 51-53, Londres.
- Godfrey, L.V., Lowenstein, T. K., Li, J., Ku, T. L., Alonso, R. N. y Jordan, T.E. 1997. Registro continuo del Pleistoceno tardío basado en un testigo de halita del salar de Hombre Muerto, Argentina. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 332-336, Antofagasta.
- González, O. 1983. Geología, alteración hidrotermal y edad del Cerro Tebenquicho, Departamento Antofagasta de la Sierra, Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 38: 49-59.
- González, O. 1984. Las ignimbritas Ojo de Ratones y sus relaciones regionales, provincia de Salta. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 206-220, Bariloche.
- Hardie, L. A., Smoot, J. P. Eugster, H. P. 1978. Saline lakes and their deposits: a sedimentological approach. *International Association of Sedimentologists. Special Publication* 2: 7-41.
- Hongn, F. D. y Seggiaro, R. E. 2001. Hoja Geológica 2566-III, Cachi. Provincias de Salta

- y Catamarca. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 248, 87 p., Buenos Aires.
- Igarzábal, A. 1984. Origen y evolución morfológica de las cuencas evaporíticas de la Puna argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 595-607, Bariloche.
- Igarzábal, A. y Poppi, R. 1980. El salar Hombre Muerto. Acta Geológica Lilloana 15(2): 103-117, Tucumán.
- Jordan, T., Alonso, R., y Godfrey L. 1999. Tectónica, subsidencia y aguas en el salar Hombre Muerto, Puna argentina. 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 254-256, Salta.
- Nicolli, H., Suriano, J., Mendez, V. y Gomez, M. 1982. Salmueras ricas en metales alcalinos del salar Hombre Muerto, Catamarca, Argentina. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 3: 187-204, Buenos Aires.
- Reichert, F. 1907. Los yacimientos de boratos y otros productos minerales explotables del territorio de Los Andes (Puna de Atacama). Anales del Ministerio de Agricultura. Sección Geología, Mineralogía y Minería 2(2).
- Rosen, M.R. 1994. The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. Geological Society of America, Special Paper 289: 1-18.
- Schalamuck, I., Fernández, R. y Etcheverry, R. 1983. Los yacimientos de minerales no metálicos y rocas de aplicación de la región del NOA. Ministerio de Economía, Subsecretaría de Minería, Anales 20, 196 p., Buenos Aires.
- Sparks, R.J.S., Francis, P.W., Hammer, R., Pankhurst, R., O'Callaghan, L., Thorpe R. y Page, R. 1985. Ignimbrites of cerro Galán Caldera, NW de Argentina. Journal of Volcanological and Geothermal Research 24: 205-48.
- Turner, J.C. 1964. Descripción geológica de la Hoja 7c. Nevado de Cachi (provincia de Salta). Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 99, 78 p., Buenos Aires.
- Turner, J.C. 1972. Puna. En Leanza, A.F. (ed.) Academia Nacional de Ciencias, Primer Simposio de Geología Regional Argentina: 91-116, Córdoba.
- Vandervoort, D.S. 1993. Non-Marine Evaporite Basin Studies, Southern Puna Plateau, Central Andes. Ph.D. Thesis, Cornell University (inédita) 189 p., Ithaca.
- Vinante, D. 2003. Estudio Geológico de la Subcuenca Boratífera Oriental del Salar Hombre Muerto, Puna Argentina. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta (inédita) 80 p., Salta.
- Viramonte, J., Alonso, R., Gutiérrez, R. y Argañaraz, R. 1984. Génesis del litio en los salares de la Puna argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 471-481, Bariloche.
- Zappettini, E., Blasco, G. y Villar, L. 1994. Geología del extremo sur del salar de Pocitos, Provincia de Salta, República Argentina. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 220-224, Concepción.
- Zimmermann, U., Moya, M. y Bahlburg, H. 1999. First finds of Lower Ordovician graptolites propose a new stratigraphic subdivision for the southern Puna (NW Argentina). 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 343-346, Salta.

Recibido: 26 de abril, 2005

Aceptado: 1 de febrero, 2006